

最適ファジィ制御を用いた制振システム 正会員 ○ 安井 省侍郎\*1

(その2: ファジィ最適適応予測制御による制振システム) 河村 廣\*1, 谷 明勲\*1  
 亘理 良昭\*1, 北川 良和\*2

1. 序

前報の主旨に基づき、制振技術<sup>(1,2)</sup>のインテリジェント化を目的として、本研究は、地震入力の予測、構造物の同定をリアルタイムに行うと共に、居住性、安全性、経済性等を総合的に考慮した最適化を可能とする、アクティブな制振システムを提示し、その有効性をシミュレーションで明らかにするものである。予測及び最適化手法には、ファジィ理論<sup>(3)</sup>を応用し、不確定性、あいまい性を合理的に処理するアルゴリズムを構築<sup>(7)</sup>した。

2. 基本システム

2-1 システムのフローダイアグラム

Fig.1に制振システムのフロー<sup>(4)</sup>を示す。地震動入力の予測、構造同定及び、応答変位と制御力のバランスを考慮した最適化を行うのが本法の特色である。

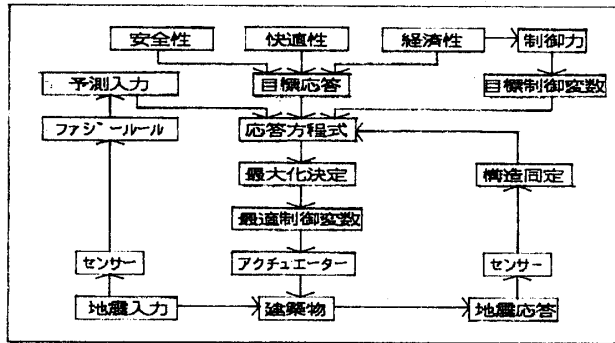


Fig.1 フロー

2-2 前提条件及び仮定

制御対象構造物は、Fig.2に示すせん断系粘弾性型2質点モデルとする。入力値xと応答値yは地動加速度、層間応答変位とし、Fig.3(a)(b)に示すように、 $\Delta t$ という制御時間を設定し、その間の絶対値の最大値X, Yを制御の対象変数とする。制振方式としては、等価可変質量型アクティブ制振と等価可変粘性型アクティブ制振(可変粘性セミアクティブ制振も可)の併用型とする。運動方程式を以下に示す。

$$m_1 \ddot{y}_1 + c_{01} \dot{y}_1 - c_{02} (\dot{y}_2 - \dot{y}_1) + k_1 y_1 - k_2 (y_2 - y_1) + u_{d1} - u_{d2} + u_{m1} = -m_1 \ddot{z}_0 \quad (1)$$

$$m_2 \ddot{y}_2 + c_{02} (\dot{y}_2 - \dot{y}_1) + k_2 (y_2 - y_1) + u_{d2} - u_{m2} = -m_2 \ddot{z}_0 \quad (2)$$

$$u_{d1} = \Delta c_1 \dot{y}_1, \quad u_{d2} = \Delta c_2 (\dot{y}_2 - \dot{y}_1) \quad (3)$$

$$u_{m1} = \alpha_1 m_1 \ddot{z}_0, \quad u_{m2} = \alpha_2 m_2 \ddot{z}_0 \quad (4)$$

$$c_{01} + \Delta c_1 = c_1, \quad c_{02} + \Delta c_2 = c_2, \quad (5)$$

$u_m$ は基礎反力、 $u_d$ は層間制御力となる。制御変数は低減係数 $\alpha$ 、可変粘性減衰係数 $\Delta c$ である。本報では $\ddot{z}_0$ を入力xとした。 $\Delta c$ に関しては、 $\Delta c \ll c$ として最大化決定はcについて行った。

x, y,  $\dot{y}$ ,  $u_d$ ,  $u_m$ はFig.3に従い、 $\Delta t$ 間の最大値をX,  $\dot{Y}$ , Y,  $U_m$ ,  $U_d$ , と大文字に置換した。

$\Delta c$ ,  $\alpha$ は、 $\Delta t$ 間は一一定値で $\Delta t$ 毎に制御変数として変化していく。c<sub>0</sub>は一定値である。

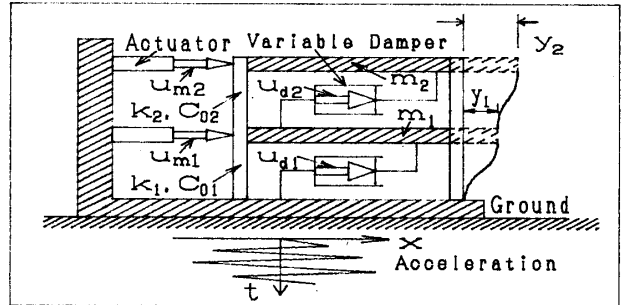
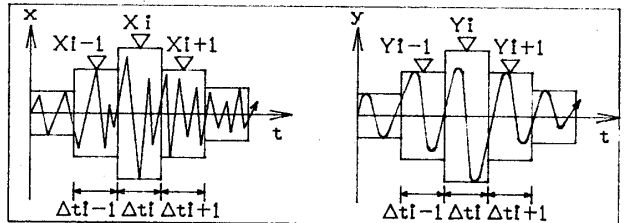


Fig.2 モデル



3. 解析 (a) Fig.3地震入力、応答の仮定 (b)

3-1 構造同定

本システムでは応答変位 $Y_i$  ( $\Delta t_i$ 間の絶対値の最大値)を制御力  $U_{m_i}$ ,  $U_{d_i}$  ( $\Delta t_i$ 間の絶対値の最大値)の両者のトレードオフによる最大化決定<sup>(6)</sup>を行っており、本決定の前に次期の $Y_{i+1}$  ( $\Delta t_{i+1}$ 間の絶対値の最大値)、 $C_{i+1}$  ( $\Delta t_{i+1}$ 間のC)と $\alpha_{i+1}$  ( $\Delta t_{i+1}$ 間の $\alpha$ )、 $X_{i+1}$ の関係、及び $\dot{Y}_{i+1}$  ( $\Delta t_{i+1}$ 間の層間応答速度の絶対値の最大値)と $C_{i+1}$  ( $\Delta t_{i+1}$ 間のC)、 $X_{i+1}$ の関係を予測しておく必要がある。ここでは以下関係を仮定する。

$$Y_{i+1} = (a_{i+1}/C_{i+1}) \cdot (1 - \alpha_{i+1}) \cdot X_{i+1} \quad (6)$$

$$\dot{Y}_{i+1} = (b_{i+1}/C_{i+1}) \cdot (1 - \alpha_{i+1}) \cdot X_{i+1} \quad (7)$$

但し、 $a_{i+1}$ は定数で、 $\Delta t_i$ 間の入出力値から上式により決定される $a_i$ をそのまま用いる。 $b_{i+1}$ も定数で、 $\Delta t_i$ 間の式(7)から求まる $b_i$ をそのまま用いることとする。又、制御力 $U_{m,i+1}$ と $U_{d,i+1}$ については仮定より次式が既に成り立っている。但し $m$ は質点の質量である。

$$U_{m,i+1} = \alpha_{i+1} \cdot m \cdot \ddot{X}_{i+1} \quad (8)$$

$$U_{d,i+1} = C_{i+1} \cdot \dot{Y}_{i+1} = b_{i+1} \cdot (1 - \alpha_{i+1}) \cdot X_{i+1} \quad (9)$$

但し、式(9)の右辺は式(7)を使って導かれている。

### 3-2 最大化決定<sup>(6)</sup>

構造安全性、居住性等を勘案すれば、望ましい層間応答変位 $Y$ はFig.4の如く与えられる。 $\mu$ は $Y$ の望ましさを与える帰属度関数で0と1の間に定義される。

又、経済性、技術的限界等を考慮して、望ましい制御力 $U$ はFig.5の如く与えられよう。 $\mu$ は $U$ の望ましさを与える帰属度関数である。

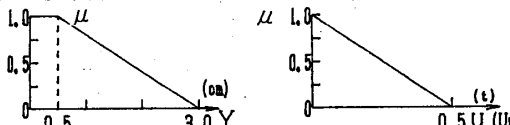


Fig.4 応答変位 $Y$ の帰属度関数 Fig.5 制御力 $U$ の帰属度関数

Fig.5の $U$ を式(8)(9)の関数を用いて $\alpha$ に変換するとFig.6のようになり最大化決定により両者の交点 $M$ に対応する $\alpha^*$ が最適低減係数となる。最適値の $\mu^*$ が1を下回るのはやむを得ないことである。

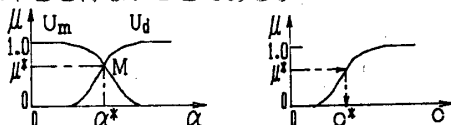
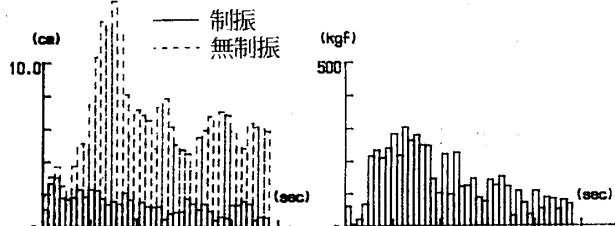


Fig.6 最大化決定 Fig.7  $\Delta c^*$ の決定方法

一方、式(6)を用いてFig.4の $Y$ を $C$ に変換すると(この時式(4)の $\alpha$ にはFig.6の $\alpha^*$ を用いる)Fig.7が得られ、Fig.6の $\mu^*$ に対応する $C$ を $C^*$ とする。

### 4. 制振結果

第1層の層間応答変位の $\Delta t = 1.2$ (sec)間毎の時系列変化をFig.8(a)に示す。実線は制御後、破線は非制振の場合に対応する。各層間制御力 $U_m$  ( $U_d$ は省略)の1.2(sec)間毎の時系列変化をFig.8(b)に示す。

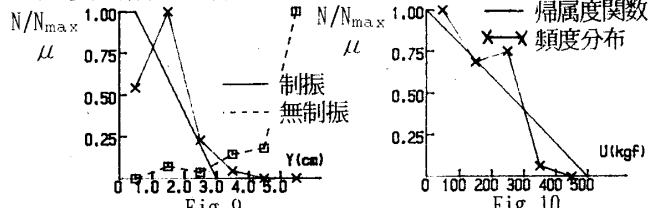


(a)層間変位応答 $Y_1$  Fig.8 時系列変化 (b)制御力 $U_{m1}$

### 5. 制振結果の検討

筆者らの研究室では様々の制振効果の検討方法を試みてきたが<sup>(5)</sup>、本論では以下の手法を採用した。層間応答変位 $Y$ 、及び層間制御力 $U_m$  ( $U_d$ は省略)に関し与えた帰属度関数Fig.4とFig.5を一種の相対頻度分布の正規化したものとみなせば、応答結果の頻度分布との直接比較が可能となる。Fig.9, Fig.10に両者の比較を示す。

但し、破線は非制振時の応答頻度分布である。



また、帰属度関数上のいわゆる望ましさの度合いについてみれば、最大化決定による決定度合と、実線の応答時の満足度との比較を正規化した頻度分布で制振効果の評価ができよう。Figs.11,12に $Y$ と $U_m$  ( $U_d$ は省略)について両者の比較を示す。

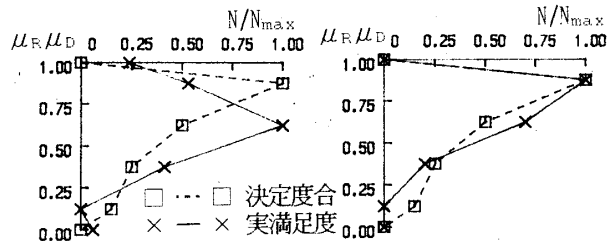


Fig.11 層間変位応答 $Y_1$  Fig.12 制御力 $U_{m1}$

### 6. 結

ファジィ集合による最大化決定は、予測、同定を含むリアルタイムの最適制振システムを有効に機能させ、応答変位、制御力それぞれの目標とする帰属度関数を満足することができ、インテリジェントなシステムの構築が可能とした。(Figs.9,10)

謝辞 本研究は、(社)建築振興協会における「制振構造システムの基本設計に関する調査研究委員会」の研究の一環として行われたものである。

文献  
 (1) 武田 寿一編, "第三編, 構造物の制振," 構造物の免震・防震・制振, 技報堂出版, 1988年, 東京, pp.205-242.  
 (2) Soong, T.T., "Active Structural Control: Theory and practice," Longman Science & Technical, England, 1990.  
 (3) Zadeh, L.A., "Fuzzy Sets", Information and Control, vol.8, 1965, pp. 338-353.  
 (4) Kawamura, H., Yao, J.T.P., "Application of Fuzzy Logic to Structural Control Motion of Civil Engineering Structures," Proc. of NAFIPS'90, Quarter Century of Fuzzyness, Toronto, vol.1, June 1990, pp.67-70.  
 (5) 山田 稔, 河村 廣, 谷 明勲, 巨理 良昭, "最大化決定によるファジィ制振構造システム," 第14回情報システム利用技術シンポジウム論文集, 1991年12月, 東京, pp.277-282.  
 (6) Bellman, R.E., Zadeh, L.A., "Decision Making in a Fuzzy Environment," Management Science, 17.4, Dec.1970, pp141-164.  
 (7) 河村 廣, 谷 明勲, 巨理 良昭, 安井 省侍郎, 山田 稔, "建築構造物のファジィ予測、適応、最適制振システム," アクティブ制振(振)シンポジウム論文集, 1992.3., 東京, pp.93-100.

\*1 神戸大学, \*2 建設省建築研究所